

云南牟定三种人工林森林水文生态效应的研究

张 玲¹, 王震洪²

(1 北京大学城市与环境学系, 北京 100871; 2 西南林学院资源学院, 昆明 650224)

摘 要: 利用标准径流小区技术, 对云南牟定三种人工林进行了森林水文生态的研究。研究表明, 在森林树种个体水文生态作用方面, 直干桉和黑荆树冠截留能力比云南松强, 而云南松树干茎流量较高, 直干桉树冠下降雨量比云南松、黑荆要大。三种树种水文生态作用的差异与其树种的生物学特征特性有关。在人工林群落调控地表径流方面, 直干桉-黑荆混交林和云南松人工林群落与无林地对照、直干桉人工林群落相比, 具有强调控径流的能力。几种树种树冠下降雨量、树干茎流量、树冠截留量与降雨量有很好的相关性, 可以用线性回归方程来模拟。人工林群落对径流的调控, 主要体现在人工林群落使地表径流发生频率降低, 径流量减小。人工林群落对径流的调控能力是的无林地的四倍, 但是在高的降雨强度下, 这种调控能力会明显降低。

关键词: 人工林群落; 水文生态作用; 地表径流

中图分类号: S715.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2001)02-0069-05

Hydrological and Ecological Effect of Three Man-made Forests in Muding County of Yunnan Province

ZHANG Ling¹, WANG Zhen-hong²

(1 Department of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2 Resources Academy, Southwest Forest College, Yunnan Province, Kunming 650224, China)

Abstract: The experiment employed the techniques of standardized runoff plot to research fixedly and quantitatively the abilities of the runoff control of three kinds of man-made forests and canopy hydrological effects in Muding county of the upper Yangtze River area in 1998 and 1999. The results indicated that the land surface runoff volume was respectively $35.19 \text{ m}^3/\text{a}$, $8.42 \text{ m}^3/\text{a}$, $15.95 \text{ m}^3/\text{a}$, $10.63 \text{ m}^3/\text{a}$ in the plots of non-forests *P. yunnanensis*, *E. maidenii* and *A. mearnsii* community. The abilities of the runoff control of the man-made forest communities were much greater than non-forest contrast, and among three man-made communities, mixed *Eucalyptus maidenii-A. mearnsii* community and *Pinus Yunnanensis* community were superior to other communities. Moreover, man-made forest communities have lower frequency of runoff at the same rainfall condition. Man-made forest communities produced runoff only when the rainfall intensity was up to $0.4 \sim 1 \text{ cm/h}$ compared to $< 0.3 \text{ cm/h}$ when non-forest contrast just begun to. For the hydrological effects of canopy, the interception rate of *A. mearnsii* was the highest among three tree species, but there was the high stem flow on the stem of *P. yunnanensis*. The mathematical models that could predict the canopy entrapment volume, stem flow volume, throughfall of several communities have been given.

Key words: man-made forest ecosystem; hydrological-ecological effect; soil surface runoff

* 收稿日期: 2001-03-21

资助项目: 国家攀登计划特别支持项目(2000-026)、云南省自然科学基金重点项目(2001-02)。

作者简介: 张玲(1974-), 女, 博士生, 主要从事生态学研究。

森林水文学是研究森林和水关系的科学。现代森林水文学是以小流域、集水区、生态系统为研究对象的^[1]。近几年,我国各流域森林水文各要素功能规律^[2~9]的研究取得了一定的成果,森林水文学模型^[10~12]等研究也有所进展。对森林水文生态效应的研究可以了解不同森林建群树种直至生态系统水平对水的调控作用机制,包括水的空间异质性形成、不同植物群落的蒸发散及径流运动、水与生态系统过程的关系等,为建立高效的植被-土壤水调控系统提供理论依据^[13]。本文以云南牟定三个主要造林树种形成的人工林为对象,与1990年以来无人干扰自然演替的生态系统为对照,严格限制水文生态影响因子,从个体、群落水平考察其水文生态作用及过程,为生态恢复工程的树种选择直至人工林群落的构建提供依据。

1 三种人工林基本情况

人工林位于东经 101°28'18", 北纬 25°24'09", 海拔 1 998 m, 坡度 10~12°, 属北亚热带半湿润季风气候, 年降雨量 800~1 000 mm, 大于或等于 50 mm 的暴雨年均 0.8 次。降雨集中在 5~10 月, 其降雨量占全年降雨量的 80%。人工林为 1990 年长江水利委员会水土保持局营造的水土保持实验林, 管护良好, 有云南松 (*Pinus Yunnanensis*)、直干桉 (*Eucalyptus maidenii*)、黑荆 (*Acacia mearsii*) 三个乔木树种, 平均胸径和平均树高分别是 2.97 cm, 4.27 m; 4.41 cm, 8.64 m; 5.31 cm, 11.04 m。各群落乔木层盖度分别为 60%, 62%, 75%, 云南松人工林群落有绒毛黄腺香青 (*Anaphalid aureo-punctata*), 拟金茅 (*Eulaliopsis binat*) 等 10 种植物; 直干桉人工林群落有云南娃儿藤 (*Tylophora yunnanensis*), 小钩耳草 (*Hedyotis uncinella*) 等 8 种植物。在无林地对照中有白茅 (*Imperata cylindrica*) 等 11 种植物。群落地表积存了枯落物, 原来整地时留下的种植沟痕迹已看不到。

2 研究原理和方法

2.1 原理

把水文学研究的对象作为一个系统, 系统中输入和输出水量保持着质量守恒, 若 $I(t)$ 为系统中输入水量, $O(t)$ 为系统中输出水量, 则系统中储水变量为^[12]:

$$\frac{ds}{dt} = I(t) - O(t) \quad (1)$$

对(1)简化后, 得

$$I - O = S \quad (2)$$

在一次降雨历时 t 的某一时刻, 输入标准径流小区的水量主要包括乔木树冠下降雨量(包括树冠穿透量和树冠水平降雨量)、树干茎流量、灌木、草本植物、枯落物水平降雨量, 径流小区内外交换进入水量, 地下水补给量构成。输出的水量主要包括标准径流小区地表径流量, 树冠截留量(包括树冠层蒸发及枝叶吸收附量), 降雨历时内蒸发量, 径流小区内外交换流出水量构成。输入量和输出量相减即为小区内瞬时储蓄水变量。由于在降雨历时内地表水分蒸发过程中, 水气分子密集、相互凝结形成新的降水过程强烈, 蒸发与凝结平衡; 人工林灌木草类覆盖低, 枯落物少; 小区修建采用了防渗技术; 小区建造于较高海拔的山坡, 降雨历时蒸发量, 灌木、草本植物、枯落物水平降雨量, 径流小区内外交换水量, 地下水补给量趋近于零, 且系统储水量是输入输出的连续可微函数, 只要对降雨历时林外降雨量, 树干茎流量, 小区地表径流量, 树冠下降雨量累计观测, 对乔木层盖度进行调查即可求得不同树种个体拦截降雨的能力及人工林群落储蓄-入渗水量^[5]。

2.2 研究方法

2.2.1 降雨量的观测 在林外空地上设置一虹吸式自动降雨收集装置, 通过记录装置获得每次降雨量、每日降雨量和每小时最大降雨强度数据。

2.2.2 三种人工林群落降雨产流量 在三种人工林群落和无林地对照内选取有代表性的地段, 分别设置 22.1 m × 5.49 m 标准径流小区。每次降雨产流后, 测定产流量^[6,7,8]。

2.2.3 人工林群落乔木树冠下降雨量和树干径流量的测定 在各群落样地上选取代表性样地, 在样地上按同心圆状每个树种选取 10 株作为研究材料。在每株树的 1.5 m 高处按螺旋状刻出一深 2 cm 的小沟, 将软塑料管头部剪开, 用小钉将其钉在刻出的小沟里, 并用乳胶将小沟的壁和软塑料管的壁粘牢, 以便降雨时树干茎流能保证从塑料管中流入树干茎流收集箱中。每种乔木选择两株样树, 在样树树冠下按树冠大小设置一镀锌铁皮降雨收集池, 底部设引流管将树冠下降雨导入收集箱中。每次降雨过后, 量取收集箱水位高, 计算集流体积^[9,10]。

3 结果与分析

3.1 林外降雨特点

通过自记雨量计的记录, 1998 年和 1999 年降雨量分别为 1 246.9 mm、756.8 mm, 是多年平均降雨量的 147% 和 89.4% (多年平均降雨量 846 mm,

1998 年降雨量是有气象记录以来最多的一年)。1998 年和 1999 年的降雨情况分别是: 降雨次数 106 次、62 次; 小雨 219 mm、197 mm, 占全年降雨量的 17. 6%、26. 0%; 中雨 456. 6 mm、183. 1 mm, 占总降雨 36. 6%、24. 2%; 大雨 373. 3 mm、218. 1 mm, 占全年降雨量的 29. 9%、28. 8%; 暴雨 198. 4 mm、158. 6 mm, 占全年降雨量的 15. 9%、20. 9%。

3.2 三种乔木树种对水文过程的影响

对 1998 和 1999 年三种人工林树种树干茎流量、树冠下降雨量和树冠截留量观测并累计见表 1 (1998 年漏测的 73 次降雨用实测 95 次建立的回归方程计算补齐再累计)。从树冠截留量、树干茎流量、树冠下降雨量占降雨的百分比, 各树种分别是: 云南松为: 46. 36%, 7. 73%, 46. 26%; 直干桉为: 49. 36%, 1. 07%, 49. 47%; 黑荆为: 53. 06%, 1. 16%, 45. 78%。树冠截留量从大到小的顺序是: 黑荆> 直干桉> 云南松(ANOVA $F_{P-A} = 1. 8, n = 95, p > 0. 001$; $F_{E-A} = 1. 5, n = 95, p > 0. 001$; $F_{P-E} = 1. 1, n = 95, p > 0. 05$, 不显著)。树干茎流量是云南松> 黑荆> 直干桉(ANOVA $F_{P-A} = 4. 5, n = 95, p > 0. 0001$; $F_{E-A} = 1. 5, n = 95, p > 0. 001$; $F_{P-E} = 3. 8, n = 95, p > 0. 0001$)。树冠下降雨量是直干桉> 黑荆> 云南松(ANOVA $F_{P-A} = 1. 9, n = 95, p >$

$0. 001$; $F_{E-A} = 1. 3, n = 95, p > 0. 05$; $F_{P-E} = 1. 0, n = 95, p > 0. 05$)。(E 代表直杆桉,A 代表黑荆,P 代表云南松), 黑荆分支多, 枝叶浓密, 分支与主干之间的夹角较大, 有较密实的树冠; 树冠枝叶层次比较多, 能形成多级的拦截体系, 上层的透过降雨和枝叶滴降在下层又被拦截; 复叶伸展比较平直, 小叶与小叶之间距离短, 复叶能够附着水珠, 增大了树冠的储水量; 叶表面拥有表皮毛, 表皮毛能够附着较多的水分, 因而, 树冠截留量大。云南松枝叶疏松, 叶为针型, 叶子与枝条、主干间的夹角小, 雨滴下落与叶子相遇后就很快滑落到叶子的基部, 若是下垂的老叶, 水珠将顺叶尖滴下, 尽管云南松主干和分枝表面比较粗糙, 对水流的摩擦阻力比起光滑的直干桉、黑荆大, 但云南松树冠上部补给流量大, 干流量就大。直干桉叶子表面光滑, 没有表皮毛, 而且分泌脂类物质较多, 叶子与水分子的亲和力低, 水珠在叶子表面极易滑落; 尽管有大的阔叶, 树冠也较大, 但枝叶疏松, 树冠内有较大的叶隙, 降雨极易透过, 所以, 树冠下降雨量大。用几种拟合方法对降雨量与树冠截留量、树干茎流量、树冠下降雨量的 95 次实测值进行拟合以反映降雨量与三者间关系, 发现以直线回归拟合方法最好, 降雨量与三者具有很好的相关性。其回归的特征值和回归方程见表 2。

表 1 三种人工林乔木树种树冠截留量、树冠下降雨量及树干茎流量

	降雨量/mm		树冠下降雨量/mm		树干茎流量/mm		树冠截留量/mm	
	1998 年	1999 年	1998 年	1999 年	1998 年	1999 年	1998 年	1999 年
云南松			579. 57	348. 96	86. 34	68. 54	589. 01	339. 3
直干桉	1246. 2	756. 8	608. 14	379. 99	11. 85	9. 56	623. 62	367. 25
黑荆树			583. 01	354. 05	14. 49	10. 2	648. 63	392. 55

表 2 三种人工林乔木树种降雨截留量、树冠下降雨量、树干茎流量与降雨量的相关性及其模拟模型

树 种		树冠下降雨量/mm	树干茎流量 /mm	树冠截留量/mm
云南松	相关系数	0. 97	0. 98	0. 99
	回归方程	$y = 0. 4600648x + 0. 0776$	$y = 0. 0714381x - 0. 0102$	$Y = 0. 4288928x + 0. 0323$
直干桉	相关系数	0. 99	0. 95	0. 96
	回归方程	$y = 0. 4965427x - 0. 1465$	$y = 0. 0105435x - 0. 0014$	$Y = 0. 4876037x + 0. 16026$
黑荆	相关系数	0. 97	0. 98	0. 99
	回归方程	$y = 0. 456786x + 0. 300647$	$y = 0. 0258901x - 0. 1561$	$y = 0. 543287x + 0. 324357$

注: $n = 95, t = 2. 89, p > 0. 01$ 。

3.3 三种人工森林地表产流量

三种人工森林地表产流量两年观测结果见表 3。不同人工林群落地表产流量和径流系数大小总趋势是: 无林地对照> 直干桉群落> 云南松群落> 桉黑荆混交林。无林地对照一般是人工林群落产流量的 3~ 4 倍; 在人工林群落中又以直干桉- 黑荆混交林调控径流的能力最强, 直干桉和云南松群落较差。

从产流降雨量看, 各群落产流降雨量分别占大气降雨量的百分比为, 1998 年: 73. 3%、53. 2%、71. 3%、60. 85%, 1999 年: 90. 5%、59. 9%、48. 1%、30. 7%。总趋势是无林地对照> 直干桉群落> 云南松群落> 直干桉- 黑荆混交林。从产流频率看, 各群落产流次数分别占全年降雨次数的百分比为, 1998 年: 29. 2%、15. 1%、29. 2%、21. 7%, 1999 年: 50%、

17.7%、19.4%、14.5%。总趋势为无林地对照>直干桉群落>直干桉-黑荆混交林>云南松群落。不同群落地表产流量、产流降雨量和产流频率具有一致性。分析自动降雨装置记录的各次降雨强度与产流量的关系表明,各样地都随着降雨强度的增大,产流量随之增大;人工林群落在不太高的降雨强度下,即使有高的总量降雨,也能发挥显著的拦蓄作用;但是不同样地在相同产流降雨强度下产流量具有明显

的差异。无林地一般降雨强度在0.3cm/h或小雨条件下就开始产流,其最低产流降雨强度是0.13cm/h;人工林群落一般要在0.4~1cm/h或中雨才开始产流;在各人工林群落中产流降雨强度又以直干桉-黑荆混交林和云南松群落最高,直干桉群落较低。另外,在产流降雨之前有充足的前期降雨,一般各样地产流量都较高。

表 3 三种人工森林地表产流量

	年份(年)	无林地对照	云南松人工林	直干桉人工林	直干桉-黑荆混交林
降雨量/mm	1998		1246.9		
	1999		756.8		
产流降雨量/mm	1998	914.5	663.3	889.7	758.9
	1999	684.8	453.5	363.8	232.4
产流次数/次	1998	31	16	31	23
	1999	31	11	12	9
径流量/m ³	1998	36.80	14.90	15.95	10.63
	1999	33.57	10.66	11.54	7.89
径流系数	平均	35.19	12.78	13.75	9.26
	1998	0.30	0.12	0.13	0.08
	1999	0.27	0.09	0.09	0.06

注:ANOVA $F_{C-P}=5.4, P>0.0001$; $F_{C-E}=6.3, P>0.0001$; $F_{C-A}=11.88, p>0.0001$; $F_{P-A}=2.22, p>0.0001$; $F_{E-A}=1.87, p>0.0022$; 其中角标, C: 无林地对照; P: 云南松人工林群落; E: 直干桉人工林群落; A: 直干桉-黑荆混交林。云南松群落和直干桉群落差异不显著。

3.4 三种人工林地表产流率

从表 4 可以看出三种人工林在相同的降雨条件下,由于地表植被系统存在着质和量的差异,使降雨在人工林群落内的分配发生了变化。无林地对照由于没有乔木层的拦截作用,系统的水量贮存空间小,产流降雨量很高。不同人工林群落由于树冠的垂直拦截作用具有差异,使同一时间空间范围内的生境产流降雨量出现了依次递减。其顺序是:无林地>直干桉群落>直干桉-黑荆混交林>云南松群落。这一递减梯度的形成表明,人工林群落中个体植物学特征和生物学特性的差异对群落水文生态作用的影响。类似地,从地表产流率的梯度递减变化也可看出,在产流降雨量具有差异的条件下,群落的输出又进一步发生了差异,这一差异反映了人工林与无林地水文生态作用的差别。

3.5 三种人工林的降雨量分配

降雨进入人工林群落后,在植被-土壤系统中开始了分配过程,分配的量依据群落物种个体特征,非生物因子的差异而具有相应的变化。根据公式

(2)及乔木层平均盖度计算得降雨量分配见表 5。由表 5 可以看出,人工林群落接纳全年降雨于群落中按大到小的顺序是:直干桉-黑荆混交林>云南松群落>直干桉群落>无林地对照。总体来说,几种人工林群落通过地上部分拦截和地表土壤的入渗,使群落地表输出的径流量大大减少,径流系数一般低于 10%,仅是无林地对照的 1/3,这表明,生态工程实施后,发挥了显著的生态效益。

表 4 三种人工林地表水产流率

项目	年度	无林地对照	云南松人工林	直干桉人工林	直干桉-黑荆混交林
林外降雨量/mm	1998	1246.9	1246.9	1246.9	1246.9
	1999	756.8	756.8	756.8	756.8
产流降雨量/mm	1998	914.5	663.3	889.7	758.9
	1999	684.1	453.5	363.8	232.4
占林外降雨量/%	1998	73.2	53.2	71.3	60.9
	1999	88.2	36.4	29.2	18.6
产流量/mm	1998	342	73.6	141.1	91.4
	1999	316	45	35	13
占产流降雨量/%	1998	37.5	11.1	15.9	12.0
	1999	46.2	9.9	9.6	5.59
占林外降雨量/%	1998	27.4	5.9	11.3	7.3
	1999	41.8	5.9	4.6	1.7

表 5 三种人工林降水量平衡分配情况¹⁾

	水分收支项目	无林地对照	云南松人工林	直干桉人工林	直干桉- 黑荆混交林
群落存留/mm	降雨收入/mm			2003.7	
	径流输出/mm	658	118.6	176.1	104.4
	径流率/%	32.8	5.9	8.7	5.2
	小计	1345.7	1885.1	1827.6	1899.3
	占总降雨/%	67.1	94.1	91.2	94.8
	其中: 乔木林冠截留/mm ²⁾	48 ³⁾	800	629	664
	下层植物、枯落物截留、入渗、雨后蒸发等/mm	1297.7	1085.1	1198.6	1235.3

(1) 1998 年和 1999 年两年合并计算; (2) 乔木林冠截留量= 降雨量 × 树冠截留率 × 乔木层平均盖度; (3) 无林地对照中将自生的云南松树冠截留量计入了乔木层林冠截留

4 结 论

(1) 从树冠及群落截留降雨能力方面, 由于生物学特征特性的差异, 直干桉和黑荆树冠截留能力比云南松强, 而云南松与其它阔叶树种相比, 树干茎流量较高; 直干桉由于枝叶疏松, 树冠下降雨量比云南松、黑荆要大。几种树种树冠降雨量、树干径流量、树冠截留量与降雨量有很好的相关性, 因此, 可以用线性回归方程来预测。

(2) 在降雨径流的调控能力方面, 无林地对照、云南松林、直干桉林、直干桉- 黑荆混交林径流率分别为 32.8%、5.9%、8.7%、5.2%, 无林地径流率明显高于人工林群落; 由于人工林有效的拦截作用, 使大部分降雨存留于群落中, 降低了径流对下游河川的威胁。在人工林群落中, 降雨径流的调控能力又以直干桉- 黑荆群落和云南松群落最强, 建议在防护林建设中多选择这样的树种。人工林群落具有如此

强调控径流能力的原因主要有: 乔木层树冠水文效应起着重要作用。从本研究中可以看出, 树冠拦截量和树干径流量大的树种构成的人工林群落, 地表产流量就小。根据本课题土壤理化性质研究结果, 人工林群落土壤具有高的非毛管孔隙和总孔隙度, 有利于径流的入渗; 地表覆盖枯落物, 能有效地防止土壤颗粒对土壤孔道的堵塞, 有利于径流下渗。

(3) 人工林群落对径流的调控, 使径流发生频率明显降低; 从降雨强度与产流量的关系看, 降雨强度对产流量影响较大, 人工林群落在不太高的降雨强度下, 虽然降雨量大, 也能发挥大的拦蓄作用; 当降雨强度很高, 如果降雨量不大, 其拦蓄作用也很明显; 但当降雨强度很高, 降雨量又比较大时, 人工林对径流的拦蓄就会达饱和, 如何在高强度降雨条件下, 采用一些措施使人工林群落具有更大的拦蓄能力, 是一个需要解决的问题。另外, 在产流降雨之前有较大的前期降雨, 一般各样地产流量都很高。

参考文献:

[1] 闫俊华 森林水文学研究进展[J] 热带亚热带植物学报, 1999, 7(4): 347~ 356

[2] 王彦辉 陇东黄土地区刺槐林水土保持效益的定量研究[J] 北京林业大学学报, 1986, 8(1): 35~ 52

[3] 董世仁, 郭景唐 华北油松人工林的透留、干流和林冠截留[J] 北京林业大学学报, 1987, 9(1): 58~ 68

[4] 王彦辉 刺槐对降雨的截持作用[J] 生态学报, 1987, 7(2): 43~ 49

[5] 马雪华 四川米亚罗地区高山冷杉林水文作用研究[J] 林业科学, 1987, 23(3): 356~ 359

[6] 魏小华, 周小峰 三种阔叶次生林的径流研究[J] 生态学报, 1989(4): 325~ 329

[7] 陈祖明, 任守贤 岷江上游森林水文效应研究[J] 地理学报, 1992, 47(1): 49~ 57

[8] 陈乾, 陈添宇 用NOAA 卫星气象资料计算复杂地形下的流域蒸散[J] 地理学报, 1993, 48(1): 61~ 69

[9] 周国逸, 余作岳 小良试验站三种植被类型地表径流效应的对比研究[J] 热带地理, 1995, 15(4): 306~ 312

[10] 周光益 杉木人工林生态系统林地径流模式的研究[J] 中南林学院学报, 1989, 9(增刊): 32~ 39

[11] 沈小东, 王腊春, 等 基于栅格数据的流域降雨径流模型[J] 地理学报, 1995, 50(3): 264~ 269

[12] 周国逸, 余作岳 广东小良试验站降雨径流关系的一个黑箱模型[J] 生态学杂志, 1995, (14) 4: 67~ 72

[13] 张增哲, 余新晓 中国森林水文研究现状和主要成果综述[A] 全国森林水文学术讨论会论文集[C], 北京: 测绘出版社, 1989. 1~ 9

[14] 王礼先, 高志义, 余新晓, 等 水土保持学[M] 北京: 中国林业出版社, 1995. 39~ 92